

Zdzisław FILUS

Instytut Elektroniki  
Politechniki Śląskiej

## METODA ELEKTROMAGNETYCZNO-AKUSTYCZNA - PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA PRĄDÓW WIROWYCH DO DEFECTOSKOPII ULTRADŹWIĘKOWEJ

**Streszczenie.** Przedstawiono wyniki badań nad wytwarzaniem i odbiorem podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczną z wykorzystaniem prądów wirowych. W metodzie tej fale ultradźwiękowe są wytwarzane i odbierane m.in. dzięki wykorzystaniu zjawisk towarzyszących prądom wirowym wzbudzonym na powierzchni badanego ośrodka przewodzącego. Zmierzono parametry zbudowanych przetworników pomiarowych korzystając z wzorców zawierających sztuczne wady.

### THE ELECTROMAGNETO-ACOUSTIC METHOD AS AN EXAMPLE OF USING EDDY CURRENTS FOR ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE TESTING

**Summary.** The results of research into electromagnetic generation and reception of ultrasonic longitudinal and transverse waves are presented. In this method the ultrasonic waves are generated and received due to phenomena accompanying eddy currents induced on the surface of investigated conducting medium. Parameters of the transducers built on the method are measured using standards with artificial failures.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД, ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

**Резюме.** В статье представлены результаты исследований генерирования и приема продольных и поперечных ультразвуковых волн электромагнитным методом с использованием вихревых токов. Для генерации и приема ультразвуковых волн этот метод использует вихревые токи, возбуждаемые на поверхности исследуемого проводящего материала. Используя эталоны с искусственными дефектами были измерены параметры построенных измерительных преобразователей.

## 1. WPROWADZENIE

Defektoskopia ultradźwiękowa stanowi jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod kontroli jakości wyrobów w przemyśle. Badania ultradźwiękowe nie tylko umożliwiają wykrycie wad badanego materiału, lecz pozwalają również na ocenę ich położenia, rozmiarów i czasem kształtu. Fale ultradźwiękowe wykorzystywane w tego rodzaju badaniach wytwarzane i odbierane są zazwyczaj przy użyciu przetworników piezoelektrycznych, które w zakresie częstotliwości typowym dla defektoskopii ultradźwiękowej (0,5-10 MHz), charakteryzują się wysoką sprawnością przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną i odwrotnie. Jednocześnie przetworniki takie cechują się małymi wymiarami i prostą konstrukcją.

Wprowadzenie fal ultradźwiękowych wytwarzanych przez przetwornik piezoelektryczny do badanego ośrodka wymaga zastosowania materialnego ośrodka sprzęgającego, którym najczęściej jest woda lub olej. Ośrodek sprzęgający jest również niezbędny w czasie odbioru fal ultradźwiękowych. Konieczność stosowania takiego ośrodka stanowi zasadniczą wadę przetworników piezoelektrycznych. Problemy związane z koniecznością zastosowania odpowiedniego ośrodka sprzęgającego potęgują się zwłaszcza podczas badania przedmiotów poruszających się z dużą prędkością względem przetwornika, przedmiotów o nieobrobionej powierzchni lub o znacznie podwyższonej temperaturze.

Rozwiązaniem powyższych problemów może być wytwarzanie fal ultradźwiękowych bezpośrednio w badanym materiale pod warunkiem, że zastosowana zostanie również odpowiednia bezstykowa metoda odbioru fal ultradźwiękowych. Spośród kilku znanych metod bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych [5] wyróżnia się metoda elektromagnetyczno-akustyczna (EMA). Przetworniki pracujące tą metodą cechują się stosunkowo prostą konstrukcją, a układy elektroniczne współpracujące z przetwornikiem EMA są podobne do odpowiednich układów wykorzystywanych w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych, z przetwornikami piezoelektrycznymi.

W niniejszej pracy opisano wyniki badań nad przetwornikami EMA prowadzonych w Zakładzie Podstaw Elektroniki Instytutu Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach [1, 2, 6, 7].



## 2. Zasada i podstawowe własności metody EMA

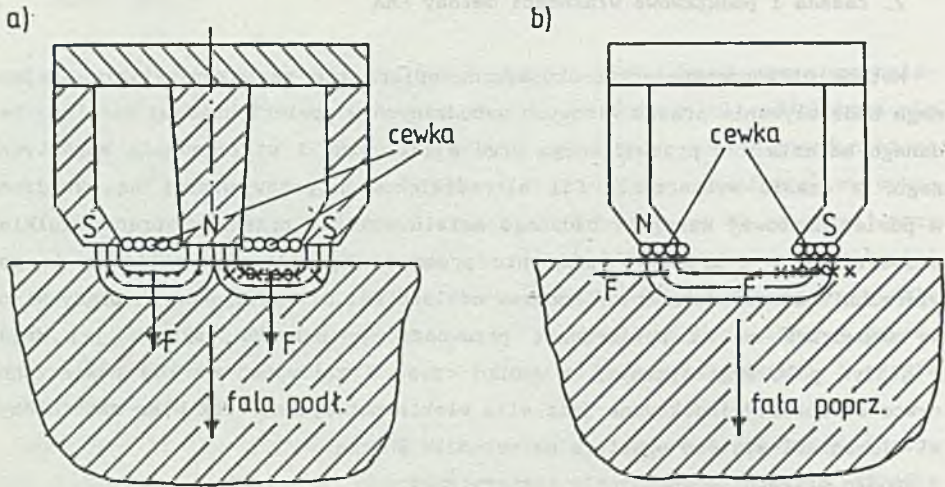
Metoda elektromagnetyczno-akustyczna opiera się na wykorzystaniu wzajemnego oddziaływania prądów wirowych wzbudzanych w powierzchniowej warstwie badanego materiału - przewodzącego prąd elektryczny i stałego pola magnetycznego. W czasie wytwarzania fal ultradźwiękowych prądy wirowe są wzbudzane w powierzchniowej warstwie badanego metalu wskutek przepływu prądu wielkiej częstotliwości o znacznym natężeniu przez cewkę nadawczą, zbliżoną do powierzchni badanego elementu. Podczas odbioru fal ultradźwiękowych prądy wirowe wzbudzane są na powierzchni przewodzącego ośrodka wskutek jej drgań w stałym polu magnetycznym, w wyniku czego w zbliżonej do tej powierzchni cewce odbiorczej indukowana jest siła elektromotoryczna. Tak więc zasadniczymi elementami systemu opartego na metodzie EMA są:

- źródło stałego, silnego pola magnetycznego;
- cewka nadawcza, zasilana na ogół krótkim impulsem prądu wielkiej częstotliwości o znacznym natężeniu;
- cewka odbiorcza, połączona poprzez odpowiedni wzmacniacz odbiorczy z układem wizualizacji lub rejestracji wyników badania (w charakterze cewki odbiorczej może być również wykorzystywana cewka nadawcza).

W zależności od kształtu cewki nadawczej, a właściwie od rozkładu wzbudzanych przez nią prądów wirowych oraz od wzajemnego położenia wektorów gęstości prądów wirowych i indukcji stałego pola magnetycznego możliwe jest wytwarzanie wszystkich rodzajów fal ultradźwiękowych wykorzystywanych w praktyce. Na rys. 1 pokazano konfiguracje przetworników przeznaczonych do wytwarzania i odbioru podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych.

Zasadniczą wadą przetworników nadawczo-odbiorczych fal ultradźwiękowych pracujących metodą EMA jest ich bardzo mała skuteczność przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną i odwrotnie, o kilka rzędów mniejsza od skuteczności przetworników piezoelektrycznych. Fakt ten powoduje, że przetworniki EMA ciągle jeszcze są przedmiotem badań.

Badania metody elektromagnetyczno-akustycznej zapoczątkowane zostały w latach sześćdziesiątych i od tego czasu opublikowano znaczną liczbę prac poświęconych temu zagadnieniu. Duża część tych publikacji, których przegląd zawierają między innymi prace [1, 3, 4, 6], poświęcona jest jednak głównie analizie teoretycznej zjawisk związanych z wytwarzaniem i odbiorem fal ultradźwiękowych metodą EMA, natomiast liczba opisanych w literaturze konstrukcji przetworników EMA, które zostały z powodzeniem zastosowane w warunkach przemysłowych, jest raczej mała.



Rys. 1. Przetworniki EMA od wytwarzania i odbioru podłużnych (a) i poprzecznych (b) fal ultradźwiękowych

Fig. 1. EMA transducers for generation and reception of ultrasonic longitudinal (a) and transverse (b) waves

Zasadniczą zaletą metody EMA jest to, że jest ona całkowicie bezstykową metodą wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych; sprzężenie między przetwornikiem i badanym obiektem realizowane jest za pośrednictwem pola elektromagnetycznego. Niemniej jednak amplituda odbieranego sygnału szybko maleje ze wzrostem odległości przetwornika od powierzchni badanego materiału, co powoduje konieczność ograniczenia tej odległości w zastosowaniach praktycznych do wartości rzędu 1-2 mm.

Model matematyczny przetwornika EMA, obejmujący opis związanych ze sobą pól: pola elektromagnetycznego - w przestrzeni (w próżni) ponad powierzchnią przewodnika oraz w jego warstwie powierzchniowej i pola akustycznego - wewnątrz badanego materiału, jest bardzo złożony. Dla metali nieferromagnetycznych, w których wspomniany wcześniej mechanizm wiroprądowy odgrywa zasadniczą rolę podczas wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, można jednak łatwo na podstawie elementarnych równań elektrodynamiki stwierdzić, że amplituda impulsów odbieranych przez nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA jest wprost proporcjonalna do amplitudy prądu w cewce nadawczej oraz do kwadratu indukcji stałego pola magnetycznego w powierzchniowej warstwie badanej próbki.



Znacznie bardziej złożony jest model matematyczny przetwornika EMA przeznaczonego do badania wyrobów wykonanych z metali ferromagnetycznych. Z jednej strony wynika to z nieliniowości równań opisujących własności magnetyczne badanego ośrodka, z drugiej zaś strony w ferromagnetykach wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczną często oparty jest na innych niż mechanizm wiroprądowy zjawiskach, takich jak np. zjawisko magnetostrykcji.

### 3. PRZETWORNIK EMA NA FALE PODŁUŻNE

Na pierwszym etapie prac, których syntetyczne podsumowanie stanowi niniejsze opracowanie, przedmiotem badań były przetworniki EMA o pokazanej na rys. 1a osiowo-symetrycznej konfiguracji, przeznaczone do wytwarzania i odbioru podłużnych fal ultradźwiękowych rozchodzących się prostopadle do powierzchni badanego ośrodka. Rozkład pola akustycznego wytwarzanego przez przetwornik EMA o takiej konfiguracji jest w dużym stopniu zbliżony do rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez konwencjonalne piezoelektryczne przetworniki na fale podłużne, stanowiące podstawowe, wykorzystywane w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących, źródła fal ultradźwiękowych.

Początkowe eksperymenty prowadzono przy użyciu przetwornika składającego się z elektromagnesu, wytwarzającego w powierzchniowej warstwie badanej próbki stałe pole magnetyczne o indukcji 0,5-1,5 T oraz z mocowanych w sposób rozłączny do rdzenia przetwornika płaskich spiralnych cewek: nadawczej i odbiorczej, o różnej liczbie zwojów i średnicy. Cewkę nadawczą przetwornika zasilano impulsami prądu o częstotliwości 1-6 MHz, wytwarzanymi na drodze rozładowywania przez tę cewkę kondensatora, uprzednio naładowanego do napięcia o wartości sięgającej 2 kV. Opracowano kilka konstrukcji nadajników impulsów wielkiej częstotliwości, w których do wytwarzania wymaganego wysokiego napięcia wykorzystano transformatory podwyższające napięcie sieciowe do wymaganego poziomu lub impulsowe przetwornice napięcia. Impulsy odbierane przez cewkę odbiorczą przetwornika EMA, po wzmocnieniu we wzmacniaczu wielkiej częstotliwości o wzmocnieniu ok. 50 dB, podawano na wejście toru odbiorczego konwencjonalnego defektoskopu ultradźwiękowego. Próbkę wykorzystywaną do badań przetwornika EMA na fale podłużne wykonane były z aluminium, miedzi i mosiądzu.

Zasilając cewkę nadawczą badanych przetworników EMA impulsami prądu wielkiej częstotliwości o wartości szczytowej sięgającej kilkudziesięciu amperów

stwierdzono, że przy indukcji stałego pola magnetycznego, wynoszącej ok. 1 T, wartość szczytowa impulsów odbieranych z próbek o grubości 50-100 mm nie przekracza na ogół kilkuset mikrowoltów. Zwiększanie odległości przetwornika od powierzchni próbki powoduje zmniejszanie się amplitudy odbieranego sygnału o 10-20 dB/mm. Wartość ta maleje ze wzrostem średnicy cewki nadawczej lub odbiorczej przetwornika. Nie stwierdzono natomiast istotnego wpływu częstotliwości wytwarzanej lub odbieranej fali ultradźwiękowej oraz rodzaju badanego metalu nieferromagnetycznego na tłumienie sygnału wywołane wzrostem odległości przetwornika od próbki.

Niekorzystną cechą przetworników EMA przeznaczonych do badania metali nieferromagnetycznych o dużej przewodności jest również zależność częstotliwości wytwarzanej gasnącej fali ultradźwiękowej od odległości przetwornika od próbki. W miarę zbliżania przetwornika do powierzchni badanego metalu zmienia się - na skutek oddziaływania tego metalu na cewkę nadawczą - jej impedancja, co powoduje z kolei wzrost częstotliwości drgań elektrycznych w cewce, a tym samym częstotliwości generowanej fali ultradźwiękowej. Dla większości zbadanych przetworników częstotliwość drgań wytwarzanych w przypadku gdy przetwornik przylega do próbki, jest o 20-40% większa niż wtedy, gdy przetwornik jest od tej próbki znacznie oddalony.

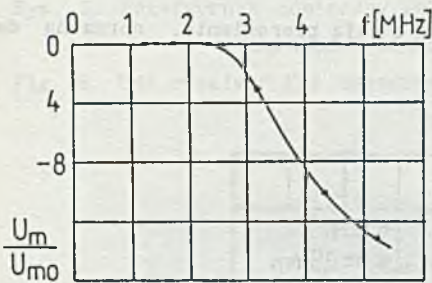


Rys. 2. Małogabarytowy przetwornik nadawczo-odbiorczy EMA podłużnych fal ultradźwiękowych

Fig. 2. Small-sized EMA transmitter-receiver for ultrasonic longitudinal waves



Wyniki badań omówione szczegółowo w pracach [1, 6], stanowiły podstawę do opracowania konstrukcji bezstykowej małowagowego przetwornika nadawczo-odbiorczego podłużnych fal ultradźwiękowych, który przedstawiono na rys. 2. Stałe pole magnetyczne wytwarzane jest przez ten przetwornik przy użyciu magnesu stałego odlanego ze stopu Alnico 400B. Pozostałe części obwodu magnetycznego przetwornika wykonane są z żelaza Armco. Indukcja stałego pola magnetycznego w szczelinie pomiędzy koncentrycznymi nabiegownikami przetwornika sięga 0,8 T. Uzwojenie przetwornika składa się z dwóch odrębnych sekcji: cewki wewnętrznej - nadawczej, nawiniętej 8 zwojami drutu o średnicy 0,25 mm oraz cewki zewnętrznej - odbiorczej, zawierającej 32 zwoje przewodu o średnicy 0,1 mm. Impulsy prądu w cewce nadawczej przetwornika wytwarzano za pomocą wspomnianego wcześniej nadajnika, rozładowując przez nią za pośrednictwem klucza tyrystorowego kondensator naładowany do napięcia 1,5 kV. Pojemność tego kondensatora dobierano odpowiednio do wymaganej częstotliwości generowanych w próbce drgań ultradźwiękowych.



Rys. 3. Zależność względnej amplitudy odbieranego sygnału od częstotliwości wytwarzanej fali ultradźwiękowej

Fig. 3. Relationship between relative signal height and frequency of generated ultrasonic wave

Własności przetwornika badano dla częstotliwości, wytwarzanej i odbieranej metodą EMA podłużnej fali ultradźwiękowej nastawianej w zakresie 1-5 MHz. Łatwość zmiany tej częstotliwości jest jedną z zalet przetworników tego typu w porównaniu z przetwornikami piezoelektrycznymi. Na rys. 3 pokazano zależność amplitudy  $U_m$  odbieranego sygnału od częstotliwości fali ultradźwiękowej, wytwarzanej w próbce aluminiowej o grubości 25 mm. Wartość maksymalna  $U_{m0}$  amplitudy tego sygnału, zmierzona przy częstotliwości 1,75 MHz, wynosi ok. 700  $\mu$ V. Odstęp napięciowy sygnału od szumu wynosi ok. 26 dB, a po zawężeniu pasma wzmacniacza odbiorczego z 10 MHz do 1 MHz ulega zwiększeniu o 10-12 dB. Dostrojenie cewki odbiorczej przetwornika do częstotliwości odbieranej fali ultradźwiękowej przy użyciu kondensatora o odpowiedniej pojemności umożliwia zwiększenie amplitudy odbieranego sygnału o 5-6 dB. Dla próbek miedzianej i mosiężnej amplituda sygnału jest o 6-8 dB mniejsza. Współczynnik określający zmniejszanie się amplitudy odbieranego sygnału ze wzrostem odległości przetwornika od powierzchni próbki wynosi ok. 12 dB/mm.

Własności przetwornika badano dla częstotliwości, wytwarzanej i odbieranej metodą EMA podłużnej fali ultradźwiękowej nastawianej w zakresie 1-5 MHz. Łatwość zmiany tej częstotliwości jest jedną z zalet przetworników tego typu w porównaniu z przetwornikami piezoelektrycznymi. Na rys. 3 pokazano zależność amplitudy  $U_m$  odbieranego sygnału od częstotliwości fali ultradźwiękowej, wytwarzanej w próbce aluminiowej o grubości 25 mm. Wartość maksymalna  $U_{m0}$  amplitudy tego sygnału, zmierzona przy częstotliwości 1,75 MHz, wynosi ok. 700  $\mu$ V. Odstęp napięciowy sygnału od szumu wynosi ok. 26 dB, a po zawężeniu pasma wzmacniacza odbiorczego z 10 MHz do 1 MHz ulega zwiększeniu o 10-12 dB. Dostrojenie cewki odbiorczej przetwornika do częstotliwości odbieranej fali ultradźwiękowej przy użyciu kondensatora o odpowiedniej pojemności umożliwia zwiększenie amplitudy odbieranego sygnału o 5-6 dB. Dla próbek miedzianej i mosiężnej amplituda sygnału jest o 6-8 dB mniejsza. Współczynnik określający zmniejszanie się amplitudy odbieranego sygnału ze wzrostem odległości przetwornika od powierzchni próbki wynosi ok. 12 dB/mm.

Charakterystyka kierunkowa  $Q(\theta)$  promieniowania przetwornika, zmierzona dla dwóch wartości jego odległości  $h$  od powierzchni próbki, przedstawiona jest na rys. 4. Została ona zmierzona za pomocą specjalnego bezstykowego przetwornika odbiorczego oraz stanowiska pomiarowego, pokazanych odpowiednio na rys. 5 i rys. 6, a wykonanych również w ramach pracy [6]. Otrzymane charakterystyki wykazują dobrą zgodność, przynajmniej w obrębie głównego "listka", z narysowaną linią ciągłą charakterystyką teoretyczną, określoną znaną zależnością dla promieniującego pierścienia o małej w porównaniu z długością fali szerokości:

$$Q(\theta) = J_0(k_L R \sin\theta)$$

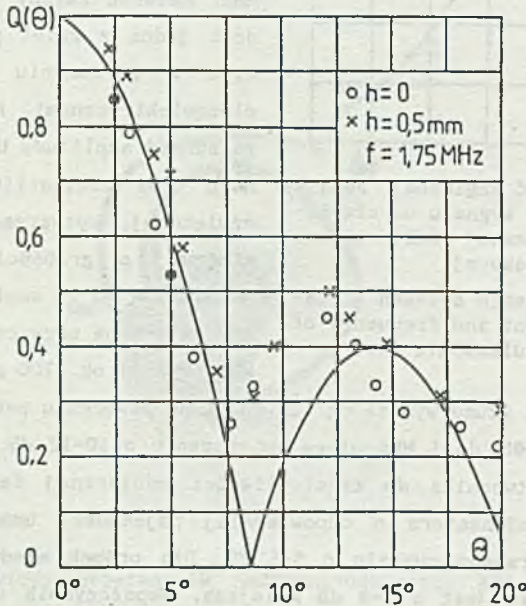
gdzie:

$J_0$  - funkcja Bessela pierwszego rodzaju zerowego rzędu,

$k_L$  - liczba falowa,

$R$  - promień pierścienia,

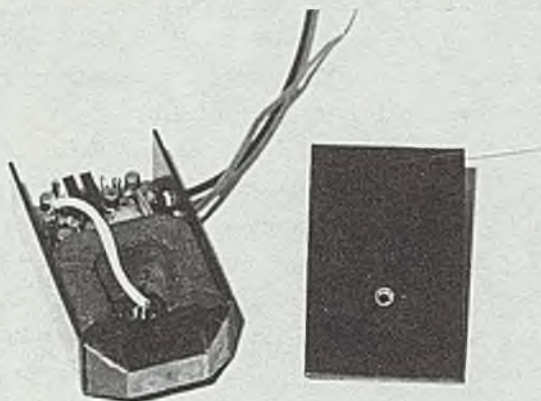
$\theta$  - kąt między rozpatrywanym kierunkiem i osią pierścienia, normalną do powierzchni próbki.



Rys. 4. Charakterystyka kierunkowa promieniowania przetwornika EMA

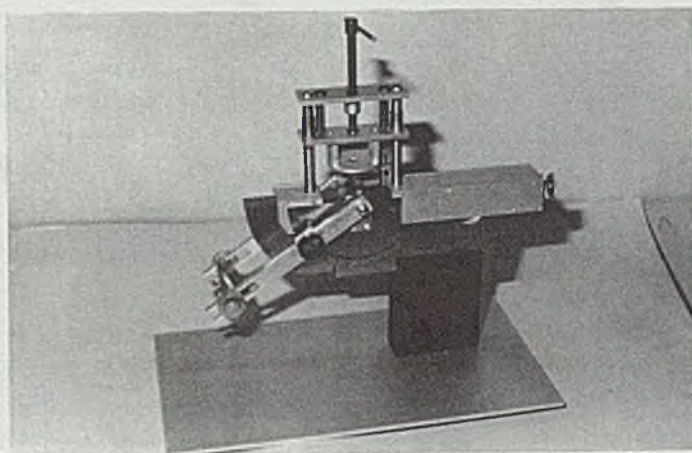
Fig. 4. Directional characteristic of EMA transmitter





Rys. 5. Przetwornik odbiorczy do badania charakterystyk kierunkowych przetworników nadawczych fal ultradźwiękowych

Fig. 5. EMA receiver for measuring directional characteristics of ultrasonic transmitters



Rys. 6. Stanowisko pomiarowe do badania charakterystyk kierunkowych przetworników nadawczych fal ultradźwiękowych

Fig. 6. Stand for measuring directional characteristics of ultrasonic transmitters

Omawiany przetwornik badany był również pod kątem możliwości jego wykorzystania w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących. Ilustracją tych badań są pokazane na kolejnych rysunkach oscylogramy.

Na rys. 7 przedstawiono porównanie impulsów odebranych przez pracującą metodą impulsową echa przetworniki: typowy piezoelektryczny przetwornik ceramiczny o średnicy 20 mm, pracujący przy częstotliwości 2 MHz (rys. 7a) oraz omawiany przetwornik EMA, dostrojony do częstotliwości 1,75 MHz (rys. 7b). Oba przetworniki przyłożono do powierzchni aluminiowej próbki o grubości 25 mm. Wzmocnienie wymagane dla zobrazowania impulsów odebranych przez przetwornik EMA jest w danym przypadku o ok. 80 dB większe niż dla przetwornika piezoelektrycznego. Porównanie obu oscylogramów dowodzi kolejnej zalety przetworników EMA w porównaniu z konwencjonalnymi przetwornikami piezoelektrycznymi. W przeciwieństwie do przetwornika piezoelektrycznego przetwornik EMA pochłania w czasie odbioru jedynie znikomą część energii rozchodzącej się w ośrodku fali ultradźwiękowej, dzięki czemu zmiany amplitudy kolejnych echa odbitych od powierzchni granicznych próbki spowodowane są praktycznie tylko tłumieniem ośrodka i rozbieżnością wiązki. Własność ta predystynuje przetworniki EMA np. do pomiaru tłumienia fal ultradźwiękowych w metalach.

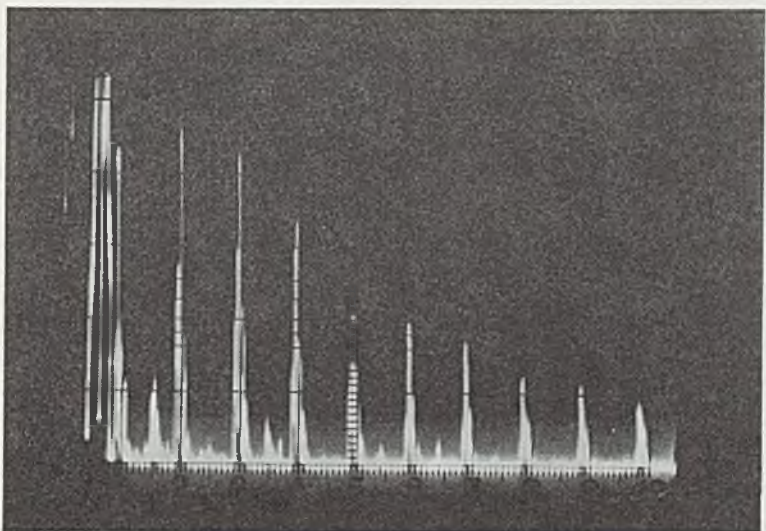
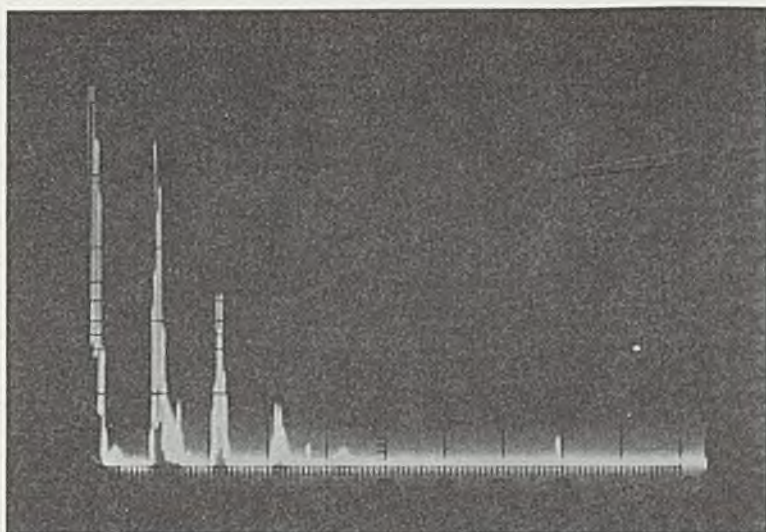
Istotną wadą przetworników EMA jest natomiast 2-3-krotnie dłuższa w porównaniu z przetwornikami piezoelektrycznymi strefa martwa. W strefie tej nie jest możliwy odbiór echa odbitych np. od wad znajdujących się w małej odległości od powierzchni badanego materiału, do której jest przyłożony przetwornik. Nie jest również możliwe, jak to jest często praktykowane w odniesieniu do przetworników piezoelektrycznych, zastosowanie warstwy opóźniającej wejścia fali ultradźwiękowej do badanego ośrodka.

Rysunek 8 obrazuje oscylogramy echa po odbiciu fali ultradźwiękowej od płaskodennego otworu o średnicy 2 mm, wykonanego w próbce aluminiowej o grubości 50 mm na głębokości 45 mm, i odebranych przez przetwornik piezoelektryczny o średnicy 10 mm i częstotliwości pracy 4 MHz (rys. 8a) oraz przez omawiany przetwornik EMA (rys. 8b).

Zarówno przewidywania teoretyczne, jak i wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że zastosowanie przetworników EMA na fale podłużne jest najbardziej celowe do badania metali nieferromagnetycznych o dużej konduktywności. Do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych w metalach ferromagnetycznych metodą elektromagnetyczno-akustyczną bardziej korzystne jest zastosowanie przetworników na fale poprzeczne.

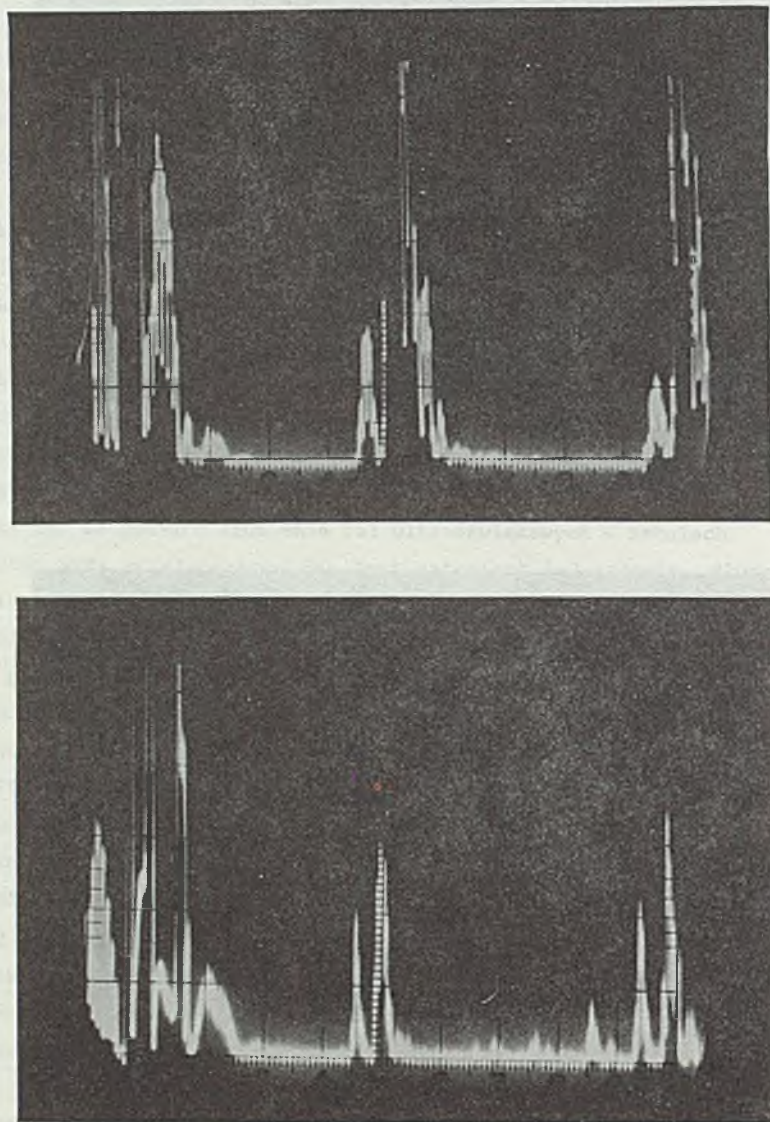


## 4. PRZETWORNIK DŃ NA FALY PODCZERWONE



Rys. 7. Porównanie sygnałów odebranych przez przetwornik piezoelektryczny (a) i elektromagnetyczny (b)

Fig. 7. Comparison between signals received by piezoelectric (a) and electromagnetic (b) transducer



Rys. 8. Porównanie sygnałów odebranych przez przetwornik piezoelektryczny (a) i elektromagnetyczny (b) po odbiciu fali ultradźwiękowej od płaskodennego otworu o średnicy 2 mm

Fig. 8. Comparison between responses to 2 mm diameter flat-bottom hole received by piezoelectric (a) and electromagnetic (b) transducer

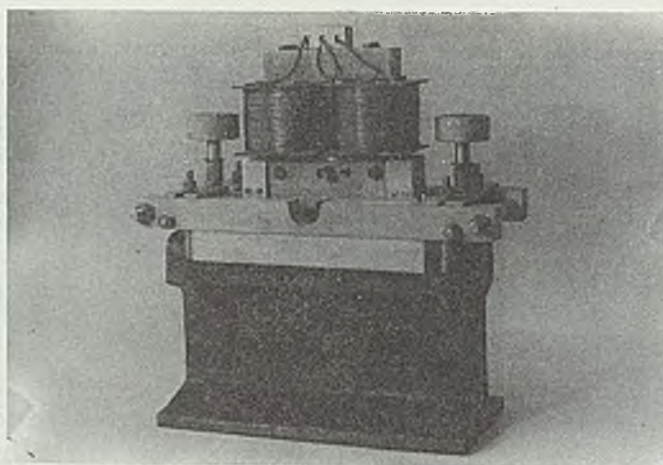


#### 4. PRZETWORNIK EMA NA FALE POPRZECZNE

Opisane szczegółowo w pracy [7] badania przetworników elektromagnetyczno-akustycznych na fale poprzeczne prowadzone były, podobnie jak w przypadku przetworników na fale podłużne, tj. przy użyciu elektromagnesu - o kształcie pokazanym na rys. 1b, wytwarzającego w powierzchniowej warstwie badanych próbek stalowych stałe silne pole magnetyczne. Do nabiegowników tego elektromagnesu mocowano wymienne cewki nadawcze i odbiorcze o różnych wymiarach i liczbach zwojów. Badane były również przetworniki, w których stałe pole magnetyczne wytwarzano przy użyciu magnesów trwałych; wykazywały one jednak mniejszą czułość niż przetworniki z elektromagnesem.

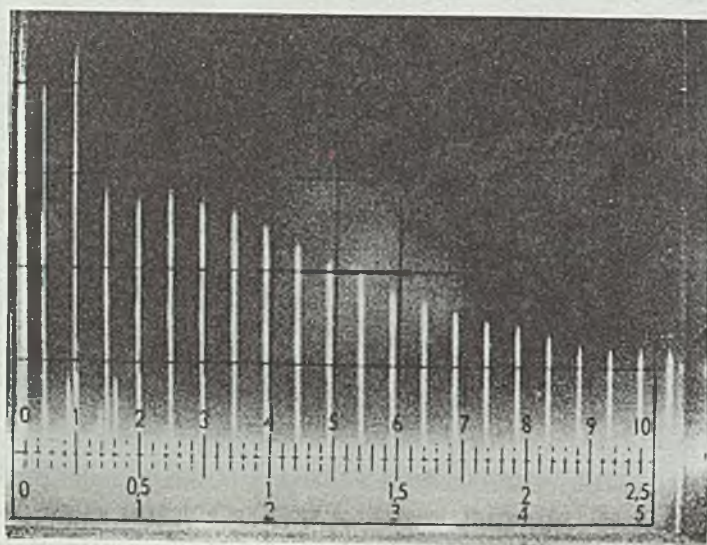
Doświadczenia przeprowadzone przy użyciu skonstruowanych przetworników prowadzą do podobnych wniosków, odnoszących się do amplitudy odbieranego sygnału i jej zależności od odległości przetwornika od powierzchni próbki, co wyniki uzyskane podczas badania przetworników na fale podłużne. Korzystną cechą przetwornika na fale poprzeczne jest fakt, że zmiana jego odległości od powierzchni ferromagnetycznej próbki nie powoduje istotnych zmian częstotliwości wytwarzanych fal ultradźwiękowych. W przetworniku tym pojawia się jednak istotny problem związany z tym, że płaska cewka nadawcza całą powierzchnią przylega do powierzchni czołowej nabiegownika, tj. w obszarze, w którym indukcja stałego pola magnetycznego osiąga maksymalne wartości. Indukowane podczas przepływu przez cewkę nadawczą impulsu prądu wielkiej częstotliwości prądy wirowe w nabiegownikach powodują generację pasożytniczej fali ultradźwiękowej również w korpusie przetwornika. Fale te po odbiciu od ścianek przetwornika są rejestrowane, stanowiąc zakłócające echa. Eliminacja tych ech wymaga wykonania nabiegowników z odizolowanych od siebie cienkich blaszek z ferromagnetyka.

Jeden ze skonstruowanych przetworników został zaadaptowany do przeprowadzenia badań mających na celu określenie jego przydatności do wykrywania wad w szynach kolejowych. Przetwornik ten pokazano na rys. 9. Uzwojenie przetwornika składa się z dwóch odrębnych cewek: nadawczej i odbiorczej; cewki te zawierają odpowiednio 8 i 30 zwojów. Impulsy prądu w cewce nadawczej wytwarzane są przy użyciu nadajnika dostarczającego napięcia o wartości szczytowej sięgającej 2 kV, natomiast sygnały z cewki odbiorczej przed podaniem ich na wejście toru odbiorczego konwencjonalnego defektoskopu ultradźwiękowego są wzmacniane o ok. 50 dB w dodatkowym wzmacniaczu, zamocowanym bezpośrednio do korpusu przetwornika. Uzwojenie elektromagnesu zasilane jest ze źródła napięcia stałego i umożliwia uzyskanie w szczelinie między nabiegownikami



Rys. 9. Przetwornik nadawczo-odbiorczy EMA poprzecznych fal ultradźwiękowych przeznaczony do badania szyn kolejowych

Fig. 9. EMA transmitter-receiver for ultrasonic transverse waves for testing railway rails



Rys. 10. Echa dna odebrane przez przetwornik EMA na fale poprzeczne położony na powierzchni wzorca W1

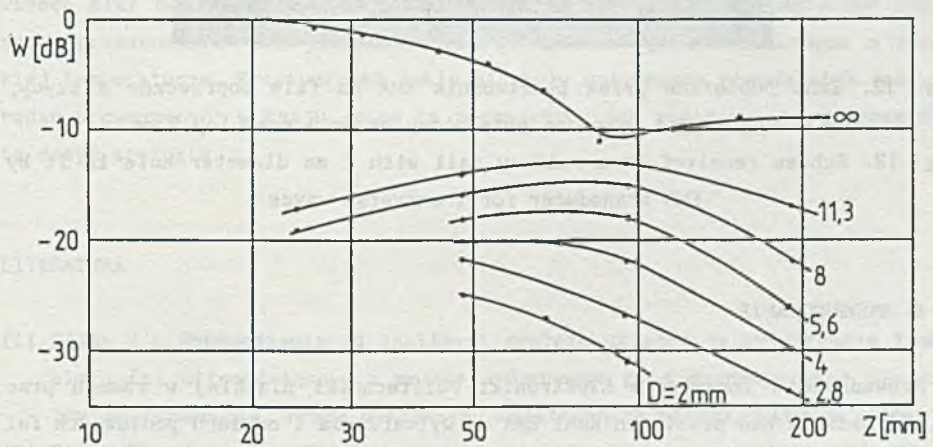
Fig. 10. Bottom echoes received by EMA transducer for transverse waves put on 25 mm thick standard



przetwornika i powierzchnią badanego wyrobu stalowego pola magnetycznego o indukcji sięgającej 1,5 T.

Na rys. 10 pokazano oscylogramy odebranych przez ten przetwornik ech dna, odpowiadających odbiciom fal ultradźwiękowych od odległych o 25 mm powierzchni wzorca W1. Dla początkowych ech odstęp napięciowy sygnału wynosi co najmniej 30 dB, a wymagane wzmocnienie całego toru odbiorczego przedwzmacniacza i wzmacniacza odbiorczego defektoskopu DI-23P wynosi ok. 70 dB. Wzrost odległości przetwornika od powierzchni próbki powoduje zmniejszanie się amplitudy odbieranego sygnału z szybkością ok. 8dB/mm. Wskutek znacznego przesterowania wzmacniacza odbiorczego impulsem nadawczym strefa martwa przetwornika wynosi ok. 20-30 mm. Dużą zaletą przetworników EMA jest natomiast ich bardzo dobra rozdzielczość. Podczas badania rozdzielczości przetworników przy użyciu wzorca W1 uzyskano wyniki znacznie lepsze niż dla głowicy piezoelektrycznej o tej samej częstotliwości (2 MHz).

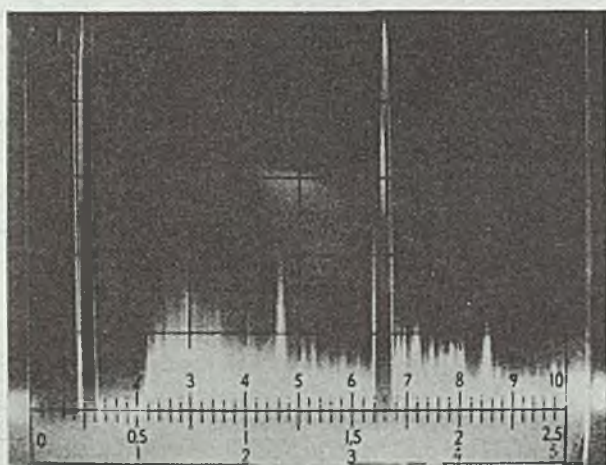
W celu zbadania przydatności przetworników EMA do oceny rozmiarów wykrywanych wad dalsze badania przetworników przeprowadzono przy użyciu szeregu wzorców stalowych z nawierconymi płaskodennymi otworami o różnej średnicy. Na rys. 11 pokazano uzyskany w ten sposób wykres OWR dla przetwornika EMA z rys. 9. Wykres ten ma charakter podobny do wykresów uzyskanych dla przetworników piezoelektrycznych.



Rys. 11. Wykres OWR dla przetwornika EMA na fale poprzeczne

Fig. 11. Distance-gain-size diagram for EMA transducer for transverse waves

Kolejne badania przeprowadzono przy użyciu odcinków szyn zawierających sztuczne wady. Przetwornik przemieszczano po powierzchni tocznej szyny obserwując odbierane sygnały na ekranie defektoskopu. Na rys. 12 przedstawiono oscylogram impulsów odebranych podczas badania szyny S49, w której szycie wywiercono przelotowy otwór o średnicy 2 mm w połowie wysokości szyny. Odpowiadający tej wadzie impuls jednak tylko w niewielkim stopniu przekracza poziom szumów. Przetwornik prowadzono również wzdłuż powierzchni szyci szyny, nie uzyskując jednak pozytywnych rezultatów, gdyż strefa martwa przetwornika jest większa od grubości szyci szyny.



Rys. 12. Echa odbierane przez przetwornik EMA na fale poprzeczne z szyny, w której szycie wykonano przelotowy otwór o średnicy 2 mm

Fig. 12. Echoes received from railway rail with 2 mm diameter hole in it by EMA transducer for transverse waves

## 5. PODSUMOWANIE

Prowadzone w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w ramach prac [6, 7] badania nad przetwornikami EMA do wytwarzania i odbioru podłużnych fal ultradźwiękowych nie doprowadziły do tej pory do skonstruowania przetworników o parametrach gwarantujących możliwość ich zastosowania w miejsce konwencjonalnych przetworników piezoelektrycznych do konkretnych celów defektoskopii w warunkach przemysłowych. Należy jednak podkreślić, że celem dotychczas-



wych prac było przede wszystkim skonstruowanie przetworników o możliwie szerokich możliwościach zastosowania, a także miniaturyzacja przetworników i obniżenie wymaganej do ich pracy mocy elektrycznej. Są to tendencje na ogół odmienne od kierunków prac badawczych i konstrukcyjnych realizowanych za granicą; opublikowane opisy rozwiązań przetworników pracujących w warunkach przemysłowych dotyczą zazwyczaj konstrukcji o znacznych wymiarach i poborze mocy, przeznaczonych do ściśle określonych zastosowań, takich, w których zastosowanie przetworników piezoelektrycznych jest niemożliwe lub związane z olbrzymimi trudnościami. Jednym z takich obszarów zastosowań są ultradźwiękowe badania nieniszczące wyrobów stalowych o znacznie podwyższonej temperaturze (do  $1000^{\circ}\text{C}$ ), zwłaszcza że według opublikowanych za granicą wyników, w temperaturze leżącej w pobliżu temperatury punktu Curie badanych materiałów ferromagnetycznych obserwuje się anormalnie silną generację podłużnych fal ultradźwiękowych. Niemniej jednak wykorzystanie osiągnięć inżynierii materiałowej (silne magnesy trwałe o małych wymiarach), nowoczesnych elektronicznych elementów kluczujących (wytwarzanie impulsów nadawczych o dużej mocy szczytowej) oraz cyfrowych metod obróbki sygnału (zwiększenie odstępów napięciowego sygnału od szumu) może doprowadzić do zwiększenia konkurencyjności przetworników EMA również w odniesieniu do badań nieniszczących prowadzonych w temperaturze zbliżonej do normalnej.

Z wymienionych wyżej względów kontynuacja badań podstawowych i doświadczalnych oraz prac konstrukcyjnych nad przetwornikami EMA wydaje się być ze wszech miar celowa również w naszym kraju. Prace te powinny dotyczyć zwłaszcza przetworników EMA przeznaczonych do badania wyrobów stalowych o wysokiej temperaturze. Przetworniki takie nie były dotychczas przedmiotem żadnych badań prowadzonych w kraju, mimo iż perspektywy ich zastosowania w przemyśle są dosyć szerokie.

#### LITERATURA

- [1] Filus Z.: Wprowadzenie do analizy i syntezy układów do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą zmiennego pola magnetycznego dla celów defektoskopii. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1985.
- [2] Filus Z., Malzacher S.: Non-contact transducer for generation and reception of ultrasonic longitudinal waves. XI Kongres IMEKO. Houston, USA, 1988.

- [3] Frost H.M.: Elektromagnetic - Ultrasound Transducers: Principles, Practice and Applications. W pracy pod red. W.P. Masona i R.N. Thurstona: Physical Acoustics, vol. XIV. Academic Press. New York 1979.
- [4] Komarow W.A.: Kwazistacyonarnoje elektromagnitno-akusticzeskoje priebrazzowanije w metalażkach. Osnowy teorli i primienienije pri nierazruszajuszczich ispytanijach.. Akademiya Nauk SSSR. Swierdłowski 1986.
- [5] Krautkrämer J.: Unconventional Methods of Generating, Receiving and Coupling of Ultrasonic Waves for Testing Materials. British Journal of NDT. Vol. 15, No. 3, May 1973.
- [6] Malzacher S., Filus Z. i inni: Opracowane podstaw techniki wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczną. Praca węzłowa 02.1/P2-05-00 prowadzona w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach w latach 1981-1985. Materiały powielane.
- [7] Malzacher S., Filus Z. i inni: Opracowanie prototypowych głowic elektrodynamicznych do ultradźwiękowego defektoskopowego badania dużych elementów stalowych. Praca w ramach CPBR nr 2.1: "Zmniejszenie stalochłonności gospodarki narodowej" prowadzona w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach w latach 1986-1989. Materiały powielane.

Recenzent: Doc. mgr inż. Adam STRYK

Wpłynęło do Redakcji w maju 1990 r.

#### A b s t r a c t

The paper presents the results of research into electromagnetic generation and reception of ultrasonic longitudinal and transverse waves which has been carried out at the Institute of Electronics of the Technical University of Silesia in Gliwice. In this method eddy currents induced on the surface of a conductive medium and a strong steady magnetic field are used to generate and receive ultrasonic waves.

The first part of the paper briefly describes some basic features of this technique on the basis of published papers. Next, results of experiments in which efficiency of a number of transducers, influence of frequency and transducer-to-sample separation on the value of received signals and direc-



